УДК 539.375

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ

А.С. Соляник, К.В. Щедривый

Томский политехнический университет
E-mail: Kosimm@mail.ru

Приведена методика испытаний металлических пластин малой толщины на трещиностойкость. Показаны особенности таких испытаний, среди которых возникновение короблений в местах закрепления пластин, появление гофр из-за потери устойчивости при внецентренном нагружении. Указаны пути устранения этих недостатков с помощью специальной оснастки. Испытания по предложенной методике позволяют сделать рекомендации по технологии и выбору сталей при создании клапанных лент.

Проблемы механики разрушения изделий из металлов при наличии трещин до сих пор до конца не решены. Наибольший интерес отечественных исследователей к этой проблеме пришелся на 70–80 гг. прошлого столетия [1–3]. Интенсивные поиски ответа на поведение трещин в металле зарубежных исследователей привели к появлению Американского и Британского стандартов испытаний на трещиностойкость. В СССР таким результатом явилось появление методики испытаний на вязкость разрушения (трещиностойкость) при статическом [4] и динамическом [5] нагружении. Одна-

ко в 2005 г. они были отменены без замены [6]. В инженерной практике и в исследовательских целях остаётся необходимость оценки прочности и долговечности изделий при наличии трещин. Поэтому дальнейшая наработка опыта механических испытаний на трещиностойкость, их совершенствование являются актуальными.

При экспериментальном определении характеристик трещиностойкости необходимо обеспечить решение нескольких задач:

1. Выбрать наиболее рациональную форму образца.
2. Создать искусственную усталостную трещину.
3. Обеспечить необходимую точность регистрации длины усталостной трещины и нагрузки в процессе испытания.
4. Провести испытания на вязкость разрушения с записью диаграммы нагружения.
5. По диаграмме достоверно количественно определить значения расчетных параметров и подсчитать характеристики трещиностойкости.

Выбор формы образца часто предопределяется исходным ассортиментом исследуемого металла (пруток, плита, лист, полоса и т.д.). Настоящая методика предназначена для определения характеристик трещиностойкости применительно к листовому металлу, лентам, оболочкам малой толщины. Ориентируясь на клапанную ленту, был выбран плоский образец с центральными отверстиями длиной 250 мм соответствующих поперечных размеров с предварительно прорезанным надрезом с одной стороны и искусственно выращенной усталостной трещиной, рис. 1.

Отверстия для базирования образцов в захватах испытательной машины просекали с помощью просечного штампа.

Наличие центральных отверстий в образце было вызвано тем, что при нагружении образца без отверстия зажатого в плоских захватах испытательной машины привело к проскальзыванию и перекосу образца относительно оси нагружения, что недопустимо. Нагружение тонких образцов осевой силой с центральными отверстиями выявило еще один недостаток – коробление образца в месте закрепления, рис. 2.

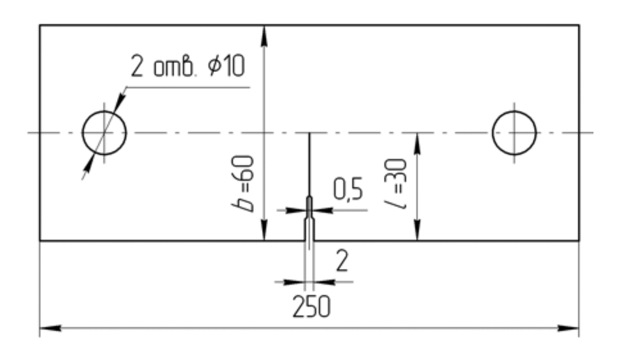


Рис. 1. *Эскиз образца для испытания на трещиностойкость*

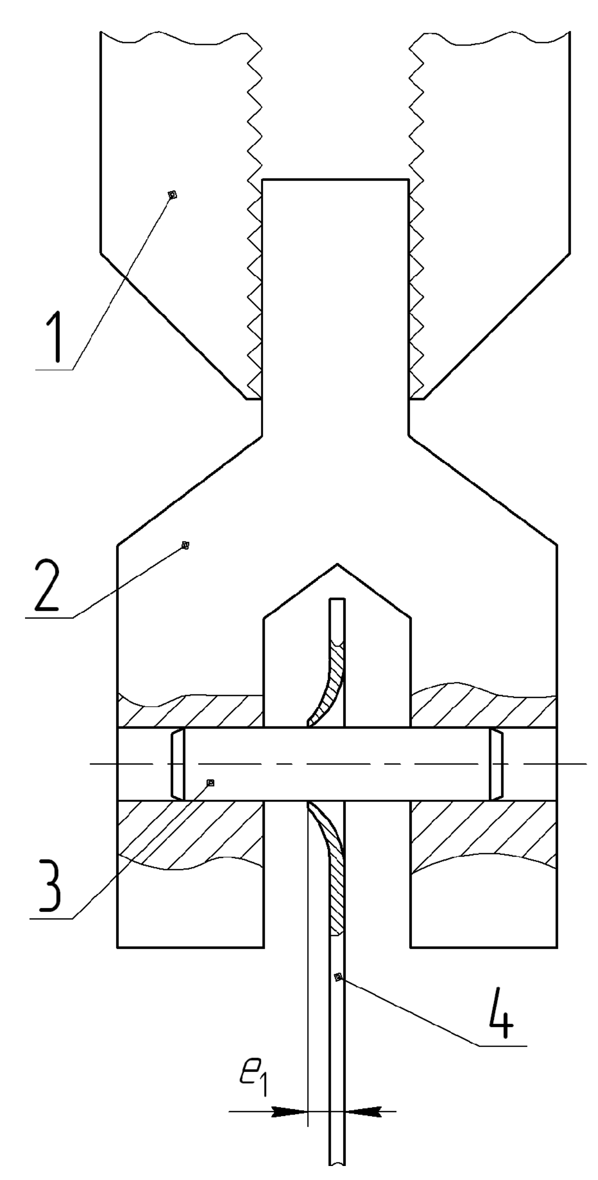


Рис. 2. *Коробление образца в процессе нагружения: 1) захваты машины; 2) вилка; 3) палец; 4) образец*

Для устранения этого эффекта было разработано приспособление, рис. 3. Для закрепления на болт – 1 надевается втулка – 2. Болт и втулка вставляются в проушину вилки – 3, одновременно болт пропускается в базирующее отверстие образца – 4 и вторую такую же втулку – 2. На болт навинчивается и затягивается гайка – 5. Вилка – 3 закрепляется в захватах машины с помощью плоских сухарей – 6. Также крепится другой конец образца. За счет стяжки гаек – 5 втулки – 2 прилегают к боковым поверхностям образца, т.е. базирование образца происходит по кольцевой поверхности контакта втулок с образцом. Эти же поверхности в основном и передают усилие растяжения образца. Это исключило коробление пластины в месте захвата при нагружении образца. Подвижная посадка втулок в отверстиях вилки позволила самоустанавливаться образцу в плоскости пластины, а в перпендикулярной плоскости малая погрешность обеспечена технологией изготовления

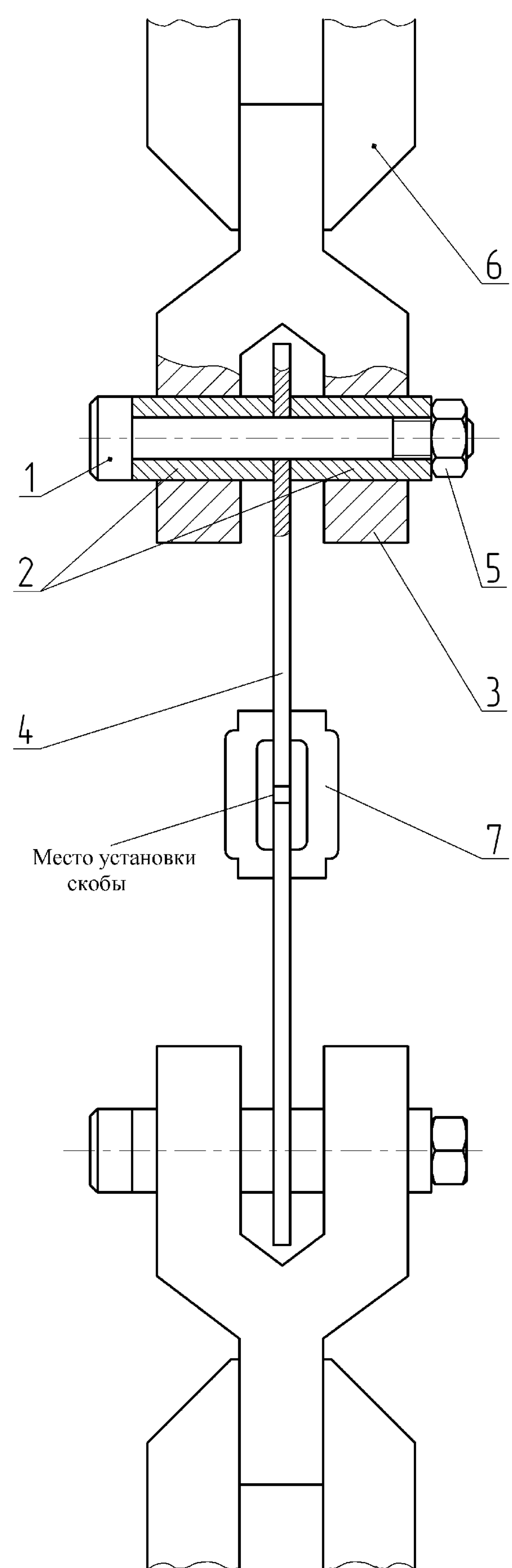


Рис. 3. *Схема приспособления для установки образцов малой толщины: 1) болт; 2) втулка; 3) вилка; 4) образец; 5) гайка; 6) захваты; 7) магнит*

втулок и жестким допуском на неперпендикулярность торцев втулки относительно ее отверстия.

При нагружении широких тонких пластин по несимметричной схеме (внецентренное растяжение) наблюдалась потеря устойчивости (в виде появления гофр), которая не зависела от способа крепления и базирования образца. При наличии концентратора напряжений в виде трещины потеря устойчивости может исказить перемещение точек крепления датчика, следящего за раскрытием трещины, и в конечном итоге отразится на диаграмме «Усилие – Раскрытие трещины *P-V*». Гофрирование удалось устранить установкой двух малогабаритных, но мощных магнитов – 7. Усилие сдвига пластины по поверхности магнита пренебрежимо мало по сравнению с нагрузкой на образец и практически не влияет на результаты испытания, а значительное усилие постоянных магнитов в нормальном направлении плоскости образцов позволило не допустить потерю устойчивости образца. При сравнительных испытаниях это тем более не влияет на конечный результат оценки трещиностойкости металлов.

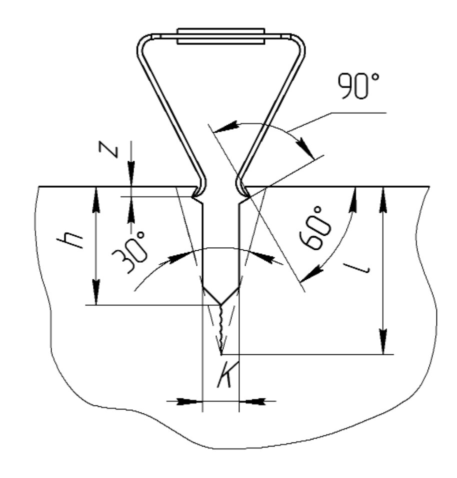
Перед созданием усталостной трещины в поперечном направлении образца алмазным кругом толщиной 2 мм делали прорезь, затем алмазным кругом толщиной 0,5 мм с заточкой под углом 30° прорезь удлиняли, что в процессе усталостного нагружения создавало условия быстрейшего появления трещины. Так как образцы имели малую толщину, то для выращивания усталостной трещины их комплектовали в пакеты. Пластины в пакете стягивали с помощью планок и болтов. По схеме трехточечного изгиба пакет, как брусок, нагружали переменными нагрузками. Число циклов нагружении при создании усталостной трещины должно быть не менее $5 \cdot 10^4$.

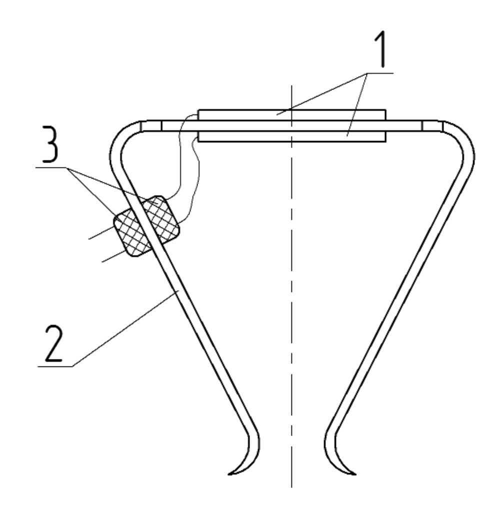
Если это условие не выполняется, значит в вершине трещины не выполнено условие [6]:

$$K_{f\max} \le 0,6 K_{1c},$$

где $K_{f\max}$ – коэффициент интенсивности напряжений при максимальном усилии циклического нагружения; K_{1c} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений при максимальном стеснении пластических деформаций.

Усталостные трещины в каждом образце пакета развиваются самостоятельно и скорость их роста различная. Поэтому трещины выращивали не на всю длину (требуемая длина l=0,5b), а на 0,4b, замеренной по боковым пластинам в пакете. Аналогично нагружали другие пакеты одной марки стали. Затем пакеты разбирали, образцы с одной длиной трещины, но меньшей требуемой, собирали в новые бруски и трещину доращивали. Длину трещины измеряли на инструментальном микроскопе. В некоторых образцах направление развития трещины отклонялось от нормального к продольной оси. Такие образцы в дальнейшем исключали из опытов или использовали при настройке машины и аппаратуры в пробных испытаниях. Результаты этих пробных испытаний в оценку трещиностойкости не включали.





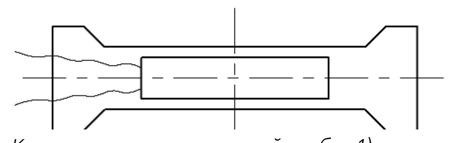


Рис. 4. *Конструкция измерительной скобы: 1) тензодатчики; 2) упругая скоба; 3) клемные прокладки*

Для проведения испытаний на трещиностойкость при статическом нагружении использовали машину ZDM-10. Во время испытаний автоматически записывали диаграмму «Усилие – Раскрытие трещины *P-V*» с помощью электронного двухкоординатного самопишущего потенциометра ПДС-021М. Для обеспечения работы потенциометра было изготовлено силоизмерительное устройство в виде реостата, который работал синхронно с силоизмерительным устройством машины. Смещение берегов трещины в точке на расстоянии (*l-z*) контролировали упругой скобой с тензодатчиками, рис. 4, которая устанавливалась в пазы образца. Сигналы от силоизмерительного устройства и упругой скобы подавались через усилитель УТ-4 на электронный потенциометр. Скобу предварительно тарировали на длинномере ИКУ-2. Таким образом, для каждого образца записывали диаграмму «*P-V*», различные типы которой, имеют вид, изображенный на рис. 5.

По соответствующей диаграмме для каждого образца определяли усилие, соответствующее моменту неустойчивости трещины P_Q. Определение величины P_Q по 5 % секущей показано на рис. 5 и соответствует методике [5]. По величине P_Q подсчитывали коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} Y_B,$$

где $Y_B = \sqrt{\frac{\ell}{b}} \cdot [1,99 - 0,41(\frac{\ell}{b}) + 18,7(\frac{\ell}{b})^2 - 38,5(\frac{\ell}{b})^3 + 53,8(\frac{\ell}{b})^4],$

b, t и ℓ – ширина и толщина образца, длина трещины.

Критическое раскрытие трещины определяли:

$$\delta_Q = \frac{V_Q}{1 + \eta \frac{(\ell - z)}{(b - \ell)}},$$

где $\eta = 3,75 \frac{b}{l} \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_H^Q} \geq 2,2$; σ_H^Q – напряжения в нетто сечении образца в момент начала нестабильности в

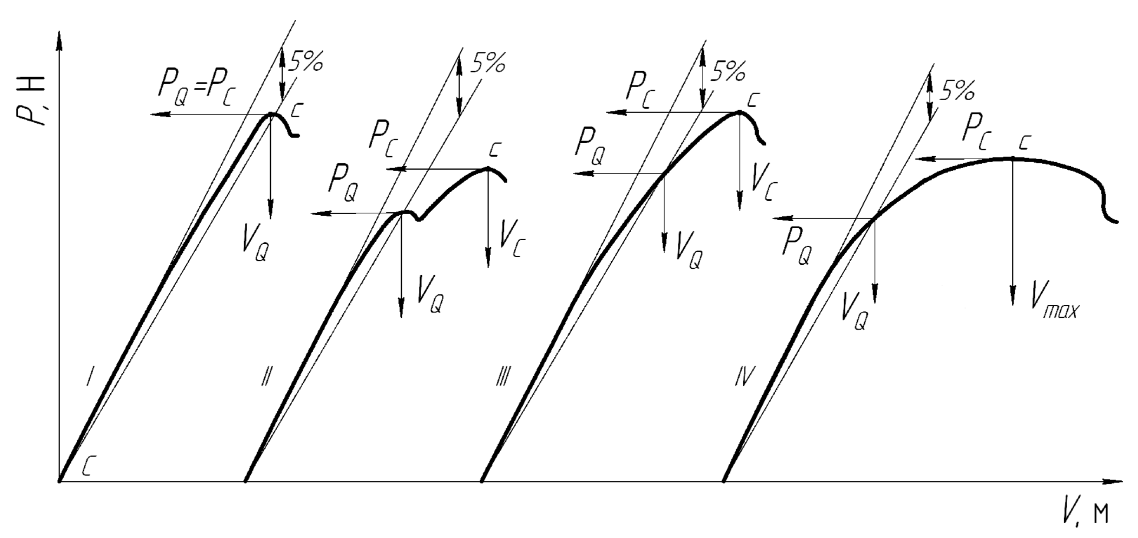


Рис. 5. *Основные типы кривых «Усилие – Раскрытие трещины P-V» и схемы их обработки*

вершине трещины при усилии P_Q; V_Q – смещение кромок надреза при усилии P_Q. P_C и V_C максимальное усилие и смещение кромок надреза при этом усилии.

Данная методика может применяться для оценки трещиностойкости изделий, относящихся к группе тонкостенных сосудов, оболочек, пластин, изготовленных из металлов и их сплавов.

По этой методике были проведены сравнительные испытания на трещиностойкость партии образцов подката и клапанной ленты шириной 60 мм толщиной 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 мм из сталей У10А; 10Х14НС; 12ХНМКТЮ; 7С27МО2 с разной технологией термообработки и ленты «САНДВИК-20».Сравнение характеристик трещиностойкости образцов из указанных сталей позволило рекомендовать наиболее перспективные технологии проката и марки сталей для дальнейших динамических испытаний и окончательно предложить легированную сталь и технологию получения клапанной ленты, не уступающей по своим характеристикам зарубежным аналогам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разрушение: пер. с англ.: в 7-и т. / Под ред. Г. Либовиц. – М.: Мир, 1973–1977.
2. Прикладные вопросы вязкости и разрушения, пер. с англ. / Под ред. Б.А. Дроздовского. – М.: Мир, 1968. – 552 с.: ил.
3. Новые методы оценки сопротивления металлов, пер. с англ. / Под ред. Ю.Н. Работнова. – М.: Мир, 1972. – 439 с.: ил.
4. РД 50-260-81. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. – М., 1977. – 73 с. ил.
5. РД 50-344-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при динамическом нагружении. – М., 1977. – 75 с. ил.
6. Руководящие документы, рекомендации и правила: указатель 2005 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. офиц. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 94 с.

УДК 699.7.054.847